

Analyse préliminaire et mise en œuvre d'une instrumentation thermique destinée à l'estimation de la position d'un front de fusion.

Morgan DAL¹, Philippe LE MASSON¹, Michel DUMONS¹, Philippe GILLES², Frédéric DESCHAUX BEAUMES³

¹ LIMATB, Université de Bretagne Sud, Lorient.

² AREVA, Paris la Défense.

³ LMGC, IUT de Nîmes.

Résumé : Le travail présenté dans cet article concerne l'étude de l'estimation de l'évolution d'un front de fusion dans le cadre de la modélisation de l'apport d'énergie lié à un procédé de soudage TIG (Tungsten Inert Gas) statique sur une durée de 20s (le projet BA3 [1]). L'objectif étant d'estimer l'évolution du front de fusion, une instrumentation optimale dans des conditions particulièrement difficiles doit être développée. Cet article présente notre réflexion quant à la définition de cette instrumentation, la méthode de mise en œuvre ainsi que les résultats obtenus.

Nomenclature

I Intensité imposée, A
 U Tension d'alimentation, V
 r, z, φ Système de coordonnées, m
 S Source de chaleur, $W.m^{-3}$

r_0 Ecart type de la Gaussienne, m

Abréviations

TC Thermocouple

Introduction

L'évolution de fronts de fusion et de solidification a fait l'objet de nombreux travaux au cours des dernières décades [2, 3]. L'objectif est toujours d'essayer de comprendre au mieux les phénomènes physiques mis en jeu afin d'optimiser l'apport ou le retrait d'énergie. Ces phénomènes faisant appel à des domaines variés de la physique (la thermique, la mécanique des fluides, la mécanique du solide, la métallurgie...) [4], une modélisation complète demeure quasiment impossible à ce jour. De plus, dans le domaine du soudage pour lequel les transferts sont fortement transitoires, les difficultés liées à la simulation sont accentuées. Dans ce cadre, et afin de conforter les modélisations, il est fondamental de développer des instrumentations qui se doivent d'être optimales.

Le travail engagé ici, concerne le procédé de soudage TIG avec lequel nous réalisons des tirs statiques d'une durée maximum de 20s. D'un point de vue expérimental, nous avons choisi d'instrumenter en thermocouples les parties restant solides à proximité de la zone fondue.

Dans cet article nous présentons, tout d'abord, l'analyse réalisée afin de positionner les instrumentations, en fonction de la sensibilité des points de mesure et de l'observation du gradient thermique. Nous expliquons ensuite, la méthodologie d'instrumentation. Enfin, suite aux essais, nous analysons les résultats obtenus et soulignons les difficultés rencontrées.

1 Définition de l'instrumentation

L'instrumentation a pour finalité d'être la source d'informations d'un problème inverse visant à estimer l'avancée d'un front de fusion. Par conséquent, elle doit être définie de façon à observer l'ensemble du phénomène et de la manière la plus pertinente possible.

1.1 Géométrie

L'échantillon est un disque d'acier inoxydable (ANSI 316L) de 160mm de diamètre et de 13.7mm d'épaisseur. Sur la *Figure 1* apparaissent les positions des différents essais de soudage répartis sur un diamètre de 80mm (3s, 6s, 9s, 20s, 20s bis et 20s ter).

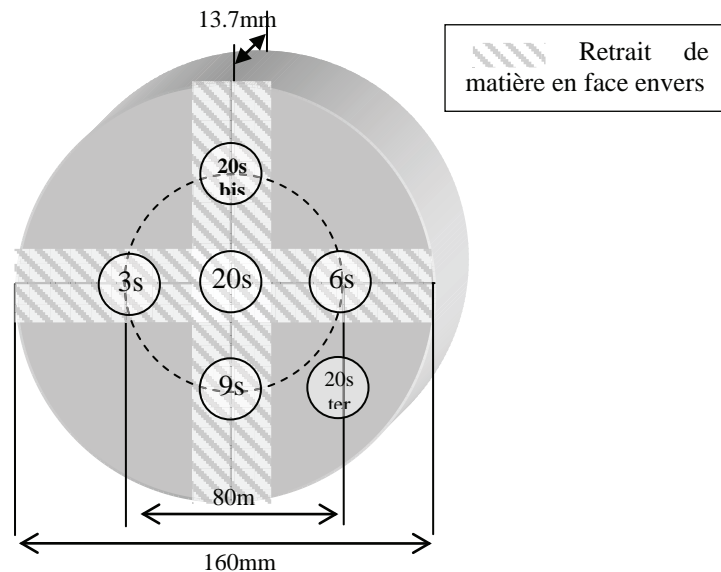


Figure 1 : Schéma de l'échantillon.

L'objectif des quatre essais de durées différentes est de cumuler les informations en leur associant des instrumentations optimales individuelles. De plus, l'essai de 20 secondes est répété trois fois (20s, 20s bis et 20s ter) (*Figure 1*) afin de vérifier la répétabilité du procédé.

1.2 Type de mesures

Dans le cadre de cette étude les positions du front de fusion seront estimées, en fonction du temps, grâce à la réduction d'un critère construit sur un écart quadratique calculé à partir des températures issues d'un modèle théorique et des températures mesurées dans le corps de la pièce par des thermocouples (TC) de type K. Ces capteurs développés au laboratoire LIMATB, sont le résultat de la soudure d'un fil de « chromel » de 50µm avec un fil d'« alumel » de même diamètre (la soudure chaude a donc un diamètre de 220µm). Chaque TC est ensuite soudé par décharge capacitive au fond d'un perçage de 650µm de diamètre. La finesse de ce dernier implique une limitation de la profondeur (≈8.5mm) au-delà de laquelle le perçage devient difficile. Ce perçage étant réalisé par la face envers de l'échantillon, un retrait de matière en forme de croix (*Figure 1*) est effectué afin de réduire l'épaisseur de la pièce à 10mm. Aussi, afin de visualiser l'effet de cette modification sur la forme finale de la zone fondue (macrographie), nous réalisons un troisième essai de 20 secondes (20s ter) sur une zone dont l'épaisseur est de 13.7mm.

La réduction du critère peut être contrainte par l'ajout de renseignements supplémentaires. En l'occurrence, le diamètre surfacique de la zone fondue est une information mesurable par analyse d'images vidéo. Nous utilisons une caméra « Phantom v5 » située à 51cm du point soudé et incliné de 30°, cette dernière n'ayant pas d'influence sur les mesures horizontales.

1.3 Essais préliminaires et simulation pour l'instrumentation optimale.

La mesure de température est réalisée au regard de certains principes [5], elle doit être :

- le plus proche possible du phénomène à observer, ici la zone fondue, de manière à avoir une sensibilité la plus importante,

- sur l'ensemble du contour de la zone fondue,
- sur plusieurs isothermes afin d'avoir une mesure du gradient thermique, et donc une image du flux.

Sachant cela et ayant à notre disposition les macrographies d'essais réalisés dans les mêmes conditions, nous avons défini une simulation simplifiée tenant compte de la mécanique des fluides et de la thermique. La source de chaleur représentative du procédé TIG est une Gaussienne surfacique $S(r)$ (1) et dont le rayon (r_0) et le rendement (η) sont des paramètres réglables et difficilement mesurables. Ces paramètres sont choisis, dans un premier temps, de manière à faire correspondre les limites de zones fondues simulées à celle observées sur les coupes macrographiques (*Figure 2*).

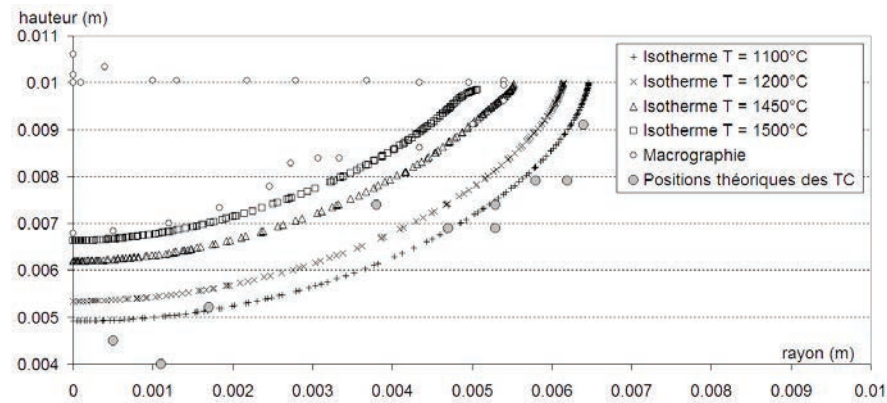


Figure 2: Comparaison Macrographies - Simulation simplifiée durée 20s

Bien que la simulation soit trop simplifiée pour représenter parfaitement la limite de zone fondue, elle nous permet cependant d'obtenir des positions pour les isothermes de 1200°C et de 1100°C à proximité desquels nous voulons placer les thermocouples.

$$S(r) = \frac{\eta UI}{2\pi r_0^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2r_0^2}\right) \quad (1)$$

2 Instrumentation

En supposant la répétabilité du procédé TIG, nous pouvons considérer les positions de limites maximales de zones fondues connues et mesurables sur les macrographies préliminaires.

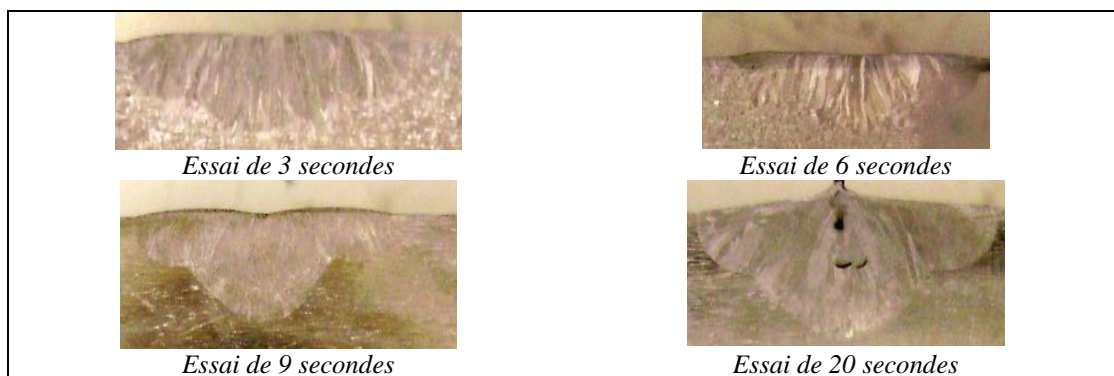


Figure 3 : Macrographies préliminaires.

De plus, la simulation simplifiée nous permet d'approcher les gradients thermiques à proximité de l'interface et donc les niveaux thermiques maximums atteints en tous points.

2.1 Mise en place des thermocouples

Compte tenu de ces données théoriques, nous avons défini des positions de mesures. De plus, le nombre de capteurs étant limité (environ 9 par tir), nous les avons placés sur les zones les plus « sensibles » afin de retrouver l'ensemble de la forme de la zone fondue.

L'échantillon étant un cylindre de faible épaisseur devant le rayon, la diffusion de la chaleur se fait principalement de façon radiale. Les parties caractéristiques des zones fondues visibles sur la *Figure 3* sont : le rayon, la profondeur et le « creux » apparaissant à mi-hauteur de la partie liquide. Ainsi, connaissant la direction de diffusion ainsi qu'une approximation des niveaux de températures nous pouvons positionner les TC de manière à capter le maximum d'informations (*Position théorique des TC : Figure 2*).

2.2 Condition expérimentale

Les essais ont été réalisés à Nîmes le 03 juin 2009 dans les locaux du LMGC [6]. Pour ces essais le procédé de soudage est alimenté par un courant de 150A, une tension d'environ 10V. La hauteur d'arc est imposée à 1,2mm, l'angle d'affûtage de l'électrode est de 45° et cette dernière est sortie de la buse de 10mm (« stick out »).

Les fréquences d'acquisition des données sont de 100Hz pour les phénomènes les plus lents comme la température et la vidéo, et de 10000Hz pour les tensions et courants qui varient beaucoup plus rapidement.

3 Résultats

L'allure des mesures de températures sur les six essais étant similaires, nous ne présentons ici que les mesures des essais 3s et 6s (*Figure 4* et 5). Sur ces figures apparaissent deux types de courbes : certaines représentant des cycles thermiques complets (1) et d'autres des cycles interrompus (2). Les courbes identifiées par le repère (2) ne représentent que la première partie de la montée en température et sont interrompues avant d'atteindre leur niveau maximum.

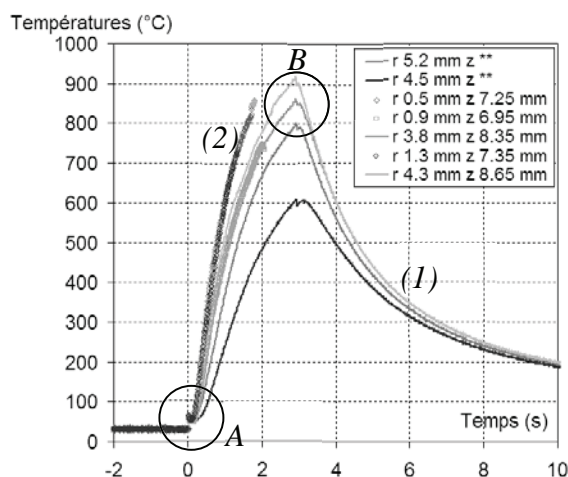


Figure 4 : Cinétiques thermiques mesurées pour l'essai de 3s.

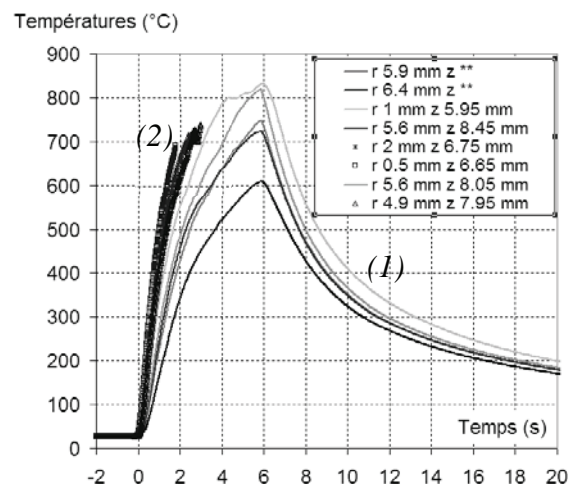


Figure 5 : Cinétiques thermiques mesurées pour l'essai de 6s.

Plusieurs éléments peuvent être observés sur l'ensemble des essais (9s, 20s et 20s bis y compris) :

- Les interruptions du signal apparaissent pour des températures supérieures à 700°C.

- Les thermocouples à l'origine des perturbations sont, dans la majorité des cas, ceux dont l'évolution de température est la plus violente (supérieure à 500°C/s).

Dans un premier temps, après visualisation de certains thermocouples par microscopie électronique à balayage, nous avons observé à plusieurs reprises des réductions du diamètre d'un des fils à proximité de la « soudure chaude ». La rupture du signal peut donc être expliquée par cette faiblesse. En effet, elle serait le point de rupture dû à de trop grandes et trop rapides déformations liées aux gradients thermiques.

Dans un second temps, malgré les allures cohérentes des courbes notées (1), nous observons un phénomène apparaissant à l'allumage de l'arc, dans la « zone A » (Figure 4), et disparaissant dans la « zone B » lors de son extinction. Les localisations particulières de ces singularités ainsi que leur constante de temps (≈ 0.01 s), amènent à conclure qu'elles ne sont pas d'origine thermique mais plutôt dues à des effets électromagnétiques liés à l'évacuation du courant (la masse) du procédé. En effet, la mesure par thermocouple est l'observation de la f.e.m. créée par effet Seebeck, donc des perturbations électromagnétiques peuvent être perçues comme des constantes ajoutées au signal observé (« offset »). L'erreur créée par cet effet à l'avantage de pouvoir être corrigée en mesurant le décalage créé lors de l'allumage de l'arc ($\approx 20^\circ\text{C}$) et donc de le soustraire à l'ensemble des mesures. Ceci, car la chute de température, lors de l'extinction de l'arc, est du même ordre de grandeur que lors de l'allumage, validant ainsi la constance du phénomène.

Compte tenu de ces observations, nous pouvons conclure que la quantité d'informations thermiques acquises est satisfaisante. Les thermocouples dont les signaux se sont interrompus au cours des acquisitions apportent des renseignements sur une partie de la montée en température.

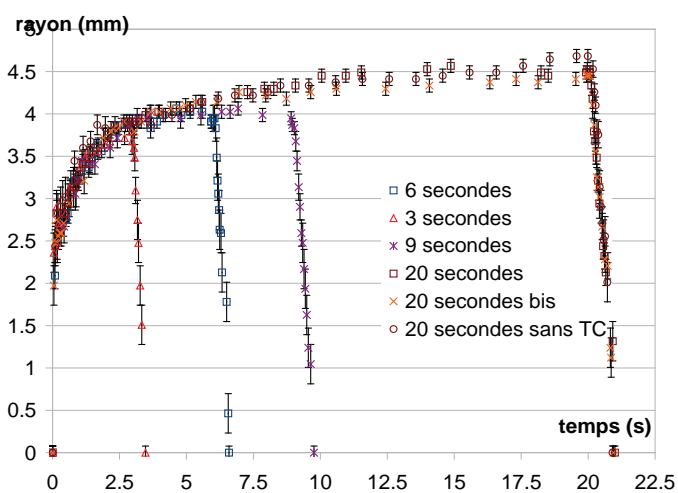


Figure 6 : Évolutions cumulées des rayons de zones fondues.

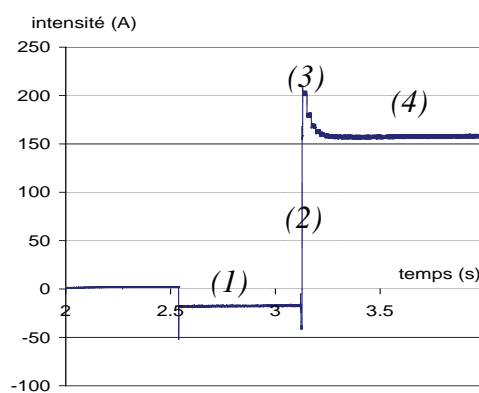


Figure 7 : Évolution de l'intensité du courant.

La seconde partie des résultats concerne le traitement des images issues des vidéos de chaque essai. En l'occurrence nous relevons les diamètres des zones fondues au cours du temps. La Figure 6 représente ces évolutions cumulées pour l'ensemble des essais. Les barres d'erreurs sont définies par rapport à l'incertitude de lecture caractérisée en fonction de la difficulté à observer l'interface. Nous observons trois phases : 1) la mise en régime du plasma occultant l'interface, 2) lorsque l'interface est clairement visible et 3) après l'extinction de l'arc, l'éclairement est fortement réduit donc la lecture est difficile.

Les informations fournies par la Figure 6 ne permettent que des conclusions partielles en surface mais sont particulièrement intéressantes. En effet, deux points sont remarquables. Le premier concerne la superposition, aux incertitudes près, des données sur les quatre durées. Cela valide l'aspect cumulatif des données en températures. La seconde porte sur les trois

essais de 20s pour lesquels une correspondance est évidente. Ceci valide donc, en surface, la répétabilité du procédé. Ces observations seront à généraliser à l'ensemble de la géométrie grâce aux analyses futures des coupes macrographiques.

L'évolution du courant apporté est présentée *Figure 7*. Quatre zones y sont identifiables : (1) l'application d'un courant négatif nécessaire à la création d'un pont liquide facilitant le développement de l'arc, (2) la brusque montée du courant lors de l'allumage de l'arc, (3) un pic représentant la stabilisation de l'arc et (4) une amplitude constante égale à la valeur réglée permettant l'apport d'énergie du soudage. Dans cet essai de soudage, l'allumage de l'arc se fait lors de la mise en contact de l'électrode avec l'échantillon. Sa remontée se fait durant 0.3s, période durant laquelle l'arc se développe, pour ensuite se stabiliser à la hauteur prédéfinie.

Conclusion

L'analyse portée sur cette expérience, nous fournit suffisamment d'informations pour mener à bien l'estimation de la position du front de fusion. Le critère d'estimation va être construit à partir des précédentes acquisitions de température et sa minimisation pourra être contrainte par les observations réalisées en surface. En considérant les dynamiques mesurées du courant et de la tension comme données d'entrée, nous pourrions réaliser des simulations plus proches de la réalité. De même que certaines observations, comme la remontée de l'électrode pour l'allumage de l'arc, affinent nos connaissances sur le procédé et nous permettront des simulations plus réalistes.

Les résultats en température valident la méthodologie de la prise d'information : les différents essais peuvent donc être cumulés. Nous avons aussi validé le fait de pouvoir mesurer directement les dimensions en surface des zones fondues. De plus, ayant identifié des particularités propres à notre instrumentation, comme les ruptures de fils de thermocouple ou encore l'utilisation de filtres plus perfectionnés pour l'acquisition d'images, nous veillerons à la perfectionner lors d'une prochaine campagne d'essais.

Les dernières étapes consisteront à obtenir les coupes macrographiques des différentes zones de l'échantillon et à mesurer les positions réelles des thermocouples. Cela afin d'analyser les amplitudes des températures et de construire le problème inverse. De plus, les erreurs de mesures engendrées par l'aspect intrusif des thermocouples reste à être quantifiées.

Références

- [1] Thèse Michel Brochard, *Modèle couplé cathode-plasma-pièce en vue de la simulation du procédé de soudage à l'arc TIG*. Université de Provence. Soutenue le 22 janvier 2009.
- [2] Crank J. *Free and moving boundary problems*. Oxford: Clarendon Press; 1984.
- [3] Doan D.D. *Modèle de source de chaleur pour la simulation du soudage avec et sans apport de chaleur*. Ecole centrale de Nantes. Soutenue le 24 octobre 2006.
- [4] Tanaka M, Terasaki H, Ushio M, Lowke J.J. *A Unified Numerical Modeling of Stationary Tungsten Inert Gas Welding Process*. Metall.&Materials Trans. A, Vol.33A (2002), pp.2043-2052.
- [5] Bardon J.P. et Cassagne B, *Température de surface – Mesure par contact*, Techniques de l'Ingénieur, R2730, 2008.
- [6] LMGC : Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de Nîmes (<http://www.lmgc.univ-montp2.fr/>)

Remerciements

Ce travail est issu du projet BA3 et nous tenons à remercier l'ensemble de nos partenaires dans le cadre de ce projet et tout particulièrement AREVA et le LMGC.